

振動ローラの加速度応答を利用した 原位置締固め管理手法に関する研究

藤 山 哲 雄 石 黒 健
建 山 和 由^{*1}

要 旨

地盤の締固めが進行し地盤剛性が増加するに伴い振動ローラの振動加速度が変化してくる現象を利用し、施工中のローラ加速度計測から地盤の締固め具合を評価しようとする研究が従来から行われている。この手法によれば、施工中にリアルタイムかつ面的に締固め度を評価できるため、従来のRI法や水置換法・砂置換法に替わり合理的な締固め管理を行うことが可能となる。

本研究では、未だ実用化に至っていない本手法の適用性を検討するために、粗粒材料を用いた転圧試験を実施した。その結果、計測加速度から求められる管理指標（乱れ率）は地盤の乾燥密度と良好な相関を示し、両者の相関関係を利用して転圧面の密度分布を推定した結果、既往のRI法とほぼ同等の精度で密度のバラツキや転圧による密度増加傾向を把握できることがわかった。また、筆者らの提案する手法により地盤の変形係数を評価した結果、既往測定手法と良好な対応を示し、ローラ加速度から地盤の変形係数の評価も可能であることがわかった。

キーワード 振動ローラ／加速度／締固め／施工管理／乾燥密度／地盤変形係数

目 次

- | | |
|--|--------------|
| 1. はじめに | 3. 実験概要 |
| 2. 振動ローラの加速度
応答を利用した原位置
締固め管理手法の概要 | 4. 実験結果および考察 |
| | 5. おわりに |

A STUDY ON QUALITY CONTROL OF COMPACTION GROUND BY ACCELERATION OF VIBRATORY ROLLER

Tetsuo FUJIYAMA Takeshi ISHIGURO
Kazuyoshi TATEYAMA

Synopsis:

Applicability of in-real time evaluation method in soil compaction using the vibratory roller was examined at field experiments. The precision of presuming dry density through the behavior of vibratory roller is discussed. It is showed that dry density measuerd by RI method correlates to index MIDARERITU which quantifies transition of roller acceleration at progress in compaction. Utilizing the correlation, it is able to evaluate dry density in the fill by the roller acceleration, and the precision of evaluation was equal to that of measuerd by RI method.

The evaluation method of ground stiffness is suggested by the Athor, and its applicability was also confirmed through the experiments.

* 1 京都大学大学院工学研究科 助教授

1. はじめに

振動ローラのローラ加速度を計測すると、地盤の締固めが進行し地盤剛性が増加するに伴い、波形が変化してくることが認められる。この現象を利用し、施工中のローラ加速度から地盤の締固め具合を判定すれば、リアルタイムかつ面的な締固め施工管理が可能となり、従来の砂置換法・水置換法等に比べ格段に合理的な管理を行うことができる。

これに着目した研究は北欧で先行し¹⁾、ドイツ・スウェーデンなどでは既に管理装置が商品化されている。

我が国においては、嶋津ら²⁾の他、いくつかの研究³⁾⁴⁾があり、上述の北欧の管理装置を試験的に用いた結果も報告されている⁵⁾。従来の研究では、ローラ加速度を何らかの形で定量化し、これと地盤密度あるいは地盤係数 K_{30} などとの関係を調べ、両者が相関を持つことを報告したものが多く、しかし、それらの結果はいずれも施工管理に適用できる「可能性がある」との言及にとどまっており、その相関性の大小（両者のバラツキ）が定量的に実施工レベルで許容される範囲なのかどうか、加速度の管理指標としてどのような指標が適切なのか、既往管理手法と比較してどの程度劣っているのかなど、実施工への展開を意識した上での適用性の議論は十分になされていない。

そこで本報告では、まず研究の初段階として粗粒材料を対象とし、室内大型土槽試験および現場転圧試験の結果をもとに、加速度を用いた手法と既往の RI 密度管理手法の精度的な比較を行い、実用化に向けた適用性の検証を試みる。

また、筆者らは転圧加速度を利用して地盤剛性を評価する手法を提案している⁶⁾。本論文では、現場実験において変形係数の計測も同時に実施し、提案手法の検証を行った結果も併せて報告する。

2. 振動ローラの加速度応答を利用した原位置締固め管理手法の概要

2.1 既往提案手法の概要

振動ローラの加速度応答を利用した地盤の締固め度評価手法の概要を以下に示す。

図-1 は、ある転圧試験で得られた標準的な振動ローラの転圧回数 1 回と 16 回におけるローラ加速度の計測結果である。これをみると、締固めが進行した後の 16 回転圧時の加速度波形は、1 回転圧時に比べ大きく変化し乱れた波形になっており、また下段に示す FFT 解析結果においては、高調波といわれる基本振動数の整数倍の振動数に対するスペクトル $S_0, S_1, S_2, \dots$ （この場合、30Hz, 60Hz, 90Hz...）、さらには 1/2 分数調波といわれる基本振動数 $\times 1/2$ の整数倍の振動数に対するスペクトル $S_0', S_1', S_2', \dots$ （この場合 15Hz, 45Hz, 75Hz, ...）が卓越してくることが認められる。そこで、例えば次のような式を定義すれば、地盤の締固めの進行に伴う加速度波

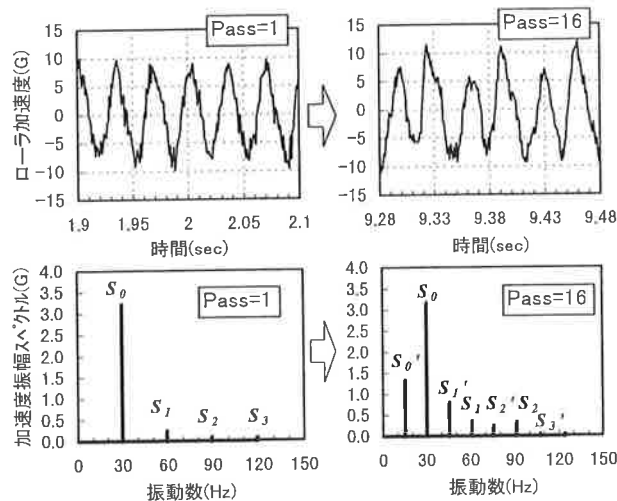


図-1 振動ローラ加速度の計測結果の例

形の変化を定量化することができる。

$$\text{乱れ率} = \frac{\text{高調波} \cdot 1/2 \text{ 分数調波スペクトルの総和}}{\text{基本振動数} + 1/2 \text{ 基本振動数のスペクトル}} \quad [1]$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S_i'}{S_0 + S_0'}$$

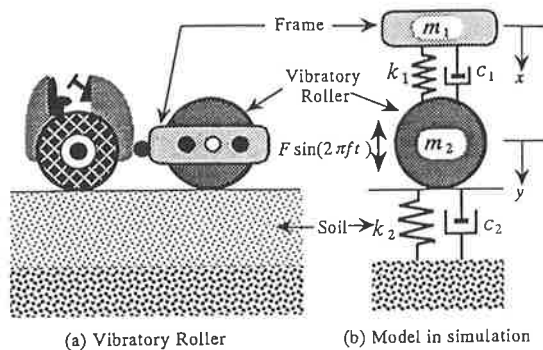
この乱れ率に相当する指標は様々に定義でき、例えば北欧で開発された Geodynamic 社の管理装置では定義式を下記のようにしている¹⁾（ただし、装置の中身はブラックボックスになっており、詳細な演算処理については不明な点が多い）。

$$CMV = \frac{S_1}{S_0} \quad [2]$$

この CMV では 1/2 分数調波スペクトルを考慮していない。しかし、締固めが進行し 1/2 分数調波スペクトルが出現した場合、CMV 値が急激に低下する可能性があることが指摘されており⁷⁾、注意を要する。

ローラ加速度変化を定量化する手法としては、このように加速度の周波数特性を利用する方法が一般的であるが、他にも加速度の最大振幅を指標とする方法⁴⁾、あるいは振動ローラ～地盤系で形成される運動方程式にローラ自重・起振力、および計測されるローラ加速度を代入し、運動方程式の逆算から地盤反力に相当する指標を求める方法なども提案されている。

本研究では、実際には高調波のみならず 1/2 分数調波の出現も観察されるケースが多いことを考慮し、加速度の定量指標としては 1/2 分数調波スペクトルまでを考慮した式[1]で定義される「乱れ率」を用いる。この乱れ率と CMV の適用性の比較を行った結果については後ほど述べる。



$$m_1 \ddot{x} + k_1(x-y) + c_1(\dot{x}-\dot{y}) = m_1 g$$

$$m_2 \ddot{y} + k_2 y + c_2 \dot{y} - k_1(x-y) - c_1(\dot{x}-\dot{y}) = m_2 g + F \sin(2\pi f t)$$

ただし、 $k_2 y + c_2 \dot{y} < 0$ のときは $k_2 = c_2 = 0$

図-2 振動ローラ～地盤系のモデル化

2.2 変形係数推定手法の概要

筆者らは、振動ローラ～地盤系を図-2 に示す 2 自由度振動モデルに置き換え、数値シミュレーションにより硬さの異なる地盤上での振動ローラ挙動を考察し、その結果から乱れ率を用いて地盤のパネ係数が次の式[3]で与えられることを見いだした⁶⁾。

$$k_2 = \frac{(\text{乱れ率} \cdot F / (m_1 + m_2)g + 1)^2 \cdot (2\pi f t)^2 \cdot m_2}{1 - 2D_2^2 \cdot \alpha + \sqrt{4D_2^4 \cdot \alpha^2 - 4D_2^2 \cdot \alpha + 1} - \alpha} \quad [3]$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{F}{(m_1 + m_2)g} \right)^2, \quad D_2 = 0.4$$

ここに、 m_1 はフレーム質量、 m_2 はローラ質量、 f は振動数、 F は起振力である。一般に振動ローラ加速度は地盤条件のみならず振動ローラの機械条件によっても変化するため、ローラ加速度～地盤特性の関係は使用する機種毎に別々に求めておく必要があるが、式[3]を用いれば任意の振動ローラに対しても機械諸元を代入することによって、試験施工を行わずとも直ちに地盤パネ係数 k_2 が求まる手法となっている。

本報告では、計測した加速度から式[1]により乱れ率を求め、式[3]を用いて地盤パネ係数の推定を行い、別途実施した横方向ロッド載荷試験から求められる原位置変形係数との比較を行う。

3. 実験概要

3.1 転圧試験概要

転圧試験は、室内の大型土槽を用いた転圧試験、および高速道路路体部における現場転圧試験⁸⁾の 2 ケースを実施した。

室内土槽転圧試験では、通常の加速度計測に加え前述の Geodynamic 社の CMV 測定器を併用して計測し、「乱れ率」および CMV の二つの加速度指標について適用性

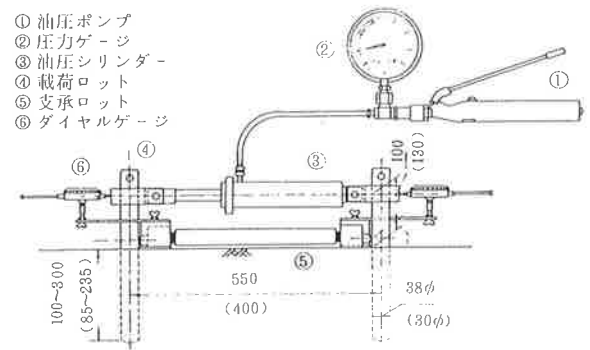


図-3 横方向ロッド載荷試験の概要図⁹⁾

表-1 転圧試験概要

		室内土槽試験	現場転圧試験
盛土形状	ヤード形状	幅3m×長さ15m	幅6m×長さ17m
	層厚	0.6m	0.3m
転圧機種	機種	酒井-SV160D	小松-JV100WA
	自重	17.4(t)	10.65(t)
	最大起振力	30.0(tf)	23.7(tf)
	公称振動数	30(Hz)	30(Hz)
転圧回数		16回	10回
計測項目	表面型RI	10カ所	6カ所
	2孔式RI	-	1カ所
	横方向載荷試験	-	4カ所
	地表面沈下量	3カ所	7カ所

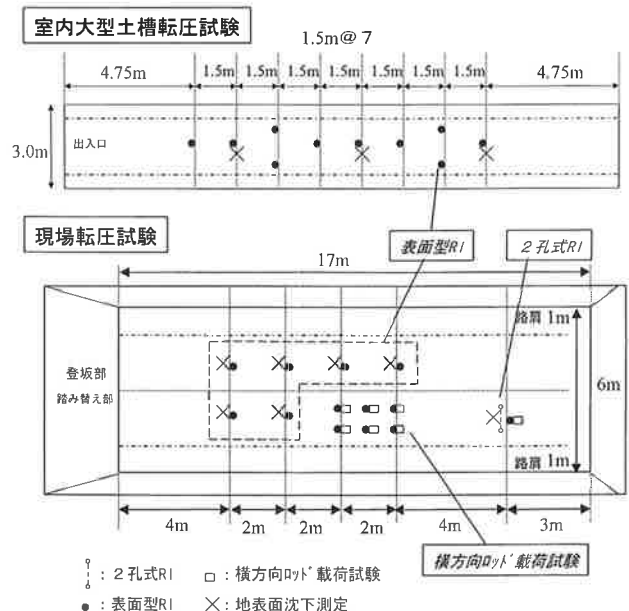


図-4 計測位置図

の検証を試みた。一方、現場転圧試験では、地盤の変形係数を横方向ロッド載荷試験⁹⁾(図-3)により計測し、式[3]に示した筆者らの提案する地盤剛性評価手法の適

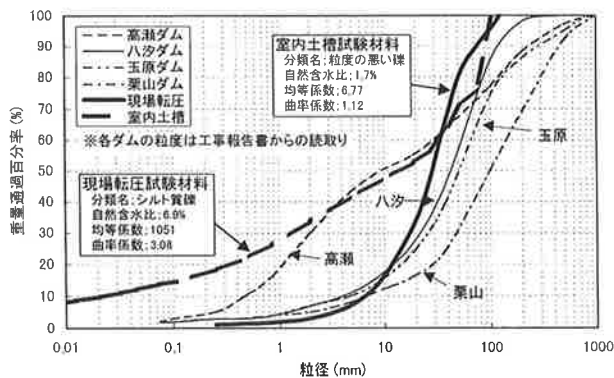


図-5 試験盛土材料の粒度分布

用性を検証した。

表-1 に 2 ケースの各転圧試験概要、転圧機種緒元、および計測項目を示す。

図-4 にはヤード内の計測位置図を示す。密度計測は表面型 RI を用いたが、現場転圧試験のみ 2 孔式 RI¹⁰⁾ により深さ方向の密度分布測定も 1 カ所実施した。

盛土材料の粒度分布を図-5 に示す。室内土槽実験、現場転圧試験とも比較的堅質な粗粒材料を用いた。このうち室内土槽実験については、フィルダムロック部に対する適用性検証を念頭に置き、ロック材の粒度分布に近い、比較的単粒系の材料を投入した（参考のため図中にはダムロック材の実績粒度（工事報告書から読み取り）を併記した）。現場転圧試験については、最大粒径約 300mm の比較的粒度分布が良好な材料であった。

なお、撒き出し時の材料のパラツキの影響を除去するために、表面型 RI 測定では線源孔壁を鋼管で保護することによって転圧時の孔壁の崩壊を防ぎ、各転圧回数において同一線源孔での測定を行った。

3.2 加速度計測方法の概要

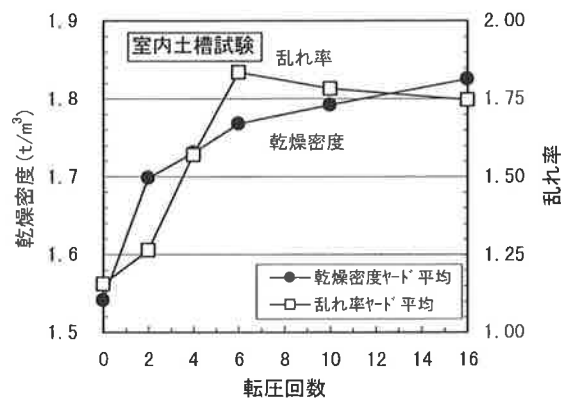
圧電素子型加速度計（20G）をローラ部に強力接着剤を用いて接着し、転圧中のローラ加速度を運転席内に置いたデータレコーダに取り込んだ。これを室内にて再生後、RI 計測範囲（約 40cm）を通過する間の加速度を FFT 解析し、式[1]により乱れ率を求めた。

4. 実験結果および考察

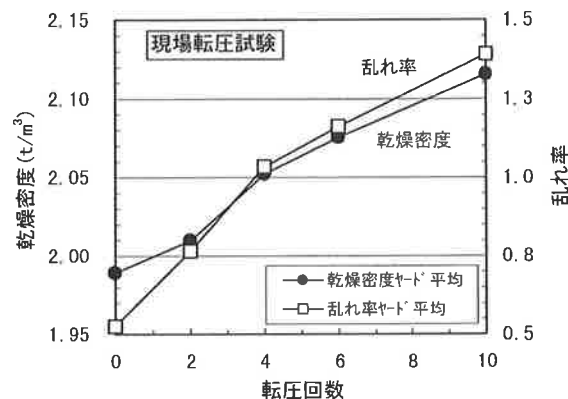
4.1 転圧回数～乱れ率、CMV の関係

図-6(a)に室内大型土槽実験、(b)に現場転圧試験における転圧回数～RI 乾燥密度・乱れ率の関係をそれぞれ示す。また図-7 には、室内大型土槽試験における転圧回数～RI 乾燥密度、CMV の関係を示す。ただし、乾燥密度、乱れ率、CMV はそれぞれヤード内の平均値で示している。

図-6(a)(b)よりわかるように、両試験ケースとも転圧による密度増加ともなっており、施工管理指標としての適用性が示唆される。一方、図-7 をみると CMV 値は転圧 3 回あたりから急激に低下し、転圧効果



(a) 室内大型土槽試験



(b) 現場転圧試験

図-6 転圧回数と RI 乾燥密度・乱れ率の関係

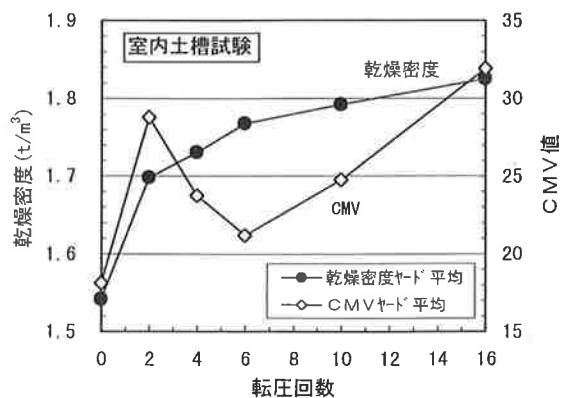


図-7 転圧回数と RI 乾燥密度・CMV の関係
(室内大型土槽試験)

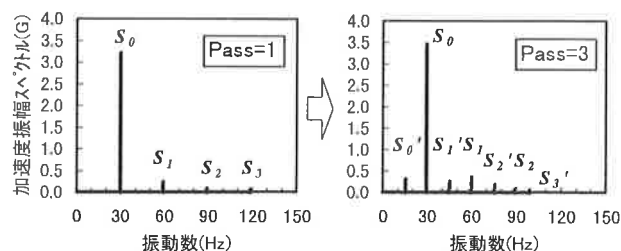


図-8 室内大型土槽試験における周波数分析結果

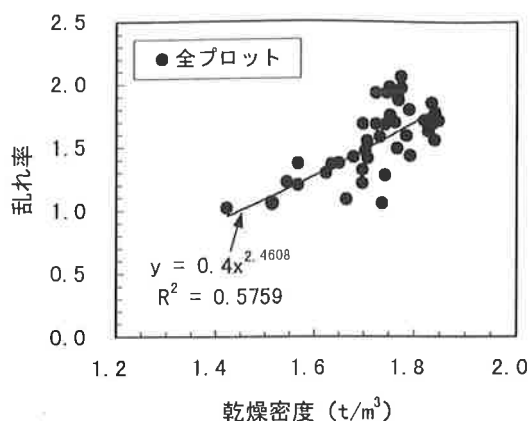


図-9 乱れ率～RI 乾燥密度の関係
(室内大型土槽試験)

を適切に表していない。

ここで、図-8 に室内土槽試験における転圧回数 1 回および 3 回の時の加速度の周波数分析結果を示す。これからわかるように、転圧回数 3 回から 1/2 分数調波スペクトルが出現している。すなわち、藤井⁷⁾も指摘するように、CMV では 1/2 分数調波スペクトルを無視しているため、締固めが進行し 1/2 分数調波スペクトルが出現した場合に CMV の値が急減してしまうことがわかる。

この 1/2 分数調波スペクトルが出現するのは、地盤剛性の増加に伴い振動ローラの地盤からの跳ね上がりが増著になり、振動ローラ～地盤系の非線形性が增大することによる振動の分岐現象と考えられるが¹¹⁾、具体的なケースで言えば、例えば十分に締固まった地盤上で起振力の大きな振動ローラを振動させた時など、ローラが大きな振幅で振動しているときに観察されることが多い現象である。

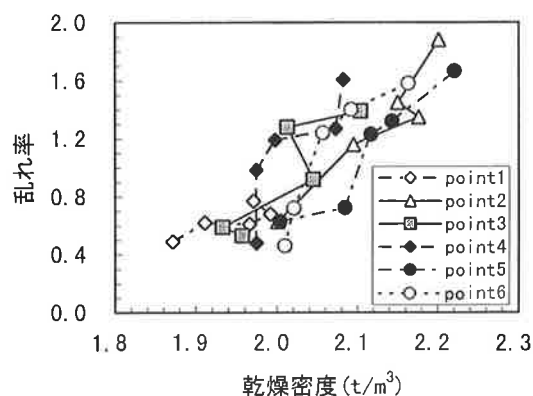
このように、振動条件によっては CMV は適切な管理指標とはならないため、管理指標としては「乱れ率」のように 1/2 分数調波スペクトルを考慮した定義が適切であるといえる。

4.2 加速度と RI 乾燥密度の関係

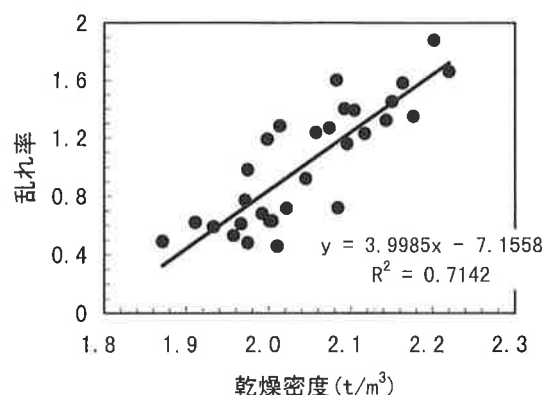
図-9 に室内土槽試験における RI 乾燥密度と、その測定ポイントの直上を通過する際の乱れ率の関係を示す。同様に、図-10(a)(b)に現場転圧試験における RI 乾燥密度と乱れ率の関係を示す。

一般にローラ加速度の変化は地盤剛性に対応すると考えられるが²⁾、図-9,10(a)をみると乾燥密度と乱れ率の相関も比較的良好であり、密度推定手法としての適用可能性が示唆される。しかしながら、若干のバラツキを生じている。以下では、このバラツキが実施工で定量的に許容できる範囲なのかどうかを検討してみる。

図-10(a)の現場転圧試験における乱れ率～RI 乾燥密度関係を各 RI 計測ポイント別に見ると(同図(b))、それぞれに乱れ率～乾燥密度関係が形成されている。すなわち、



(a)全プロット



(b)計測ポイント別

図-10 乱れ率～RI 乾燥密度の関係
(現場転圧試験)

図-10(a)の全点プロットでは一見ある程度のバラツキがあるように見えるが、これは場所毎に異なる乱れ率～乾燥密度関係が重なり合ったためと解釈できる。

換言すれば、乱れ率はヤード内の局所的な材料特性のバラツキをある程度反映していると判断できる。そこで、図-10(a)の全点プロットの乱れ率～乾燥密度関係を直線近似し、この相関式を粒度特性など材料のバラツキを加味したヤード内の平均的な乾燥密度の推定式と仮定する。さらに、加速度は施工中連続測定しているため、これを RI 計測ポイントにとらわれずに 1m ピッチで細かくピックアップする(約 20 ポイント)。そしてこれら多点の乱れ率から、図-10(a)の近似直線を利用して乾燥密度を推定すると、図-11 のヒストグラムに示すように転圧面の乾燥密度の分布状態を多点的に推定することができる。

このヒストグラムの上に、実測の 6 ポイントの RI 乾燥密度を斜線で重ね書きしてみた。これをみると、加速度による推定乾燥密度は各転圧回数にて最大 0.2(t/m³)程度の幅のバラツキをもつが、従来の RI 法による実測の乾燥密度もほぼ同等のバラツキを生じていることがわかる。一般に粗粒材料では、材料自体のバラツキの大きさや撒

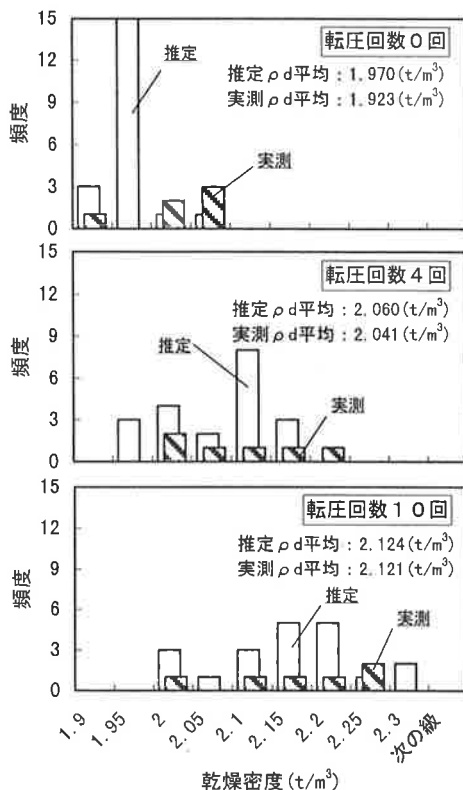


図-11 加速度による推定密度と RI 密度分布

き出し時の材料分離の影響によって、この程度の乾燥密度のバラツキが生じることが多い¹²⁾。したがって粗粒材料においてはそのバラツキの大きさから、盛土体の真の転圧状況を把握するには可能な限り多点的に密度測定が行えることが望ましいのは言うまでもない。

図-12には、室内大型土槽試験に対しても同様な方法で密度推定を行い、加速度からの推定密度、RI 実測密度それぞれの平均、および $\pm\sigma$ の幅を比較した。図-12をみると、推定乾燥密度と実測乾燥密度の分布はほぼ同程度のバラツキをもっており、かつそれぞれの平均値同士を比較すると、最大でも $\pm 0.05(\text{t/m}^3)$ 程度の差しか生じていないことがわかる（例えば別途実施されたダムロック材の大型三軸試験による室内乾燥密度～内部摩擦角 ϕ 関係を参照すれば、乾燥密度 $\pm 0.05(\text{t/m}^3)$ の幅は内部摩擦角にして約 ± 1.5 度程度の幅にしかすぎない）。

すなわち、今回用いたような粗粒材料では、撒き出し時に生じた場所毎のばらつきが大きく、既往の RI 測定手法を用いても相当の密度のばらつきが生じ、これを加速度からの推定によっても同等の精度で推定可能であること、また、その推定段階に多少の近似を含んでいても、多点的に密度分布を推定すれば、盛土内の平均的な密度を把握できることがわかる。

一般に盛土の安定計算は円弧滑り計算で行われるが、この場合盛土内の全ての密度が基準値を上回る必要はなく、平均密度が基準値を上回っていればよいと考えられる¹³⁾。しかしながら、フィルダムロック部などは、もと

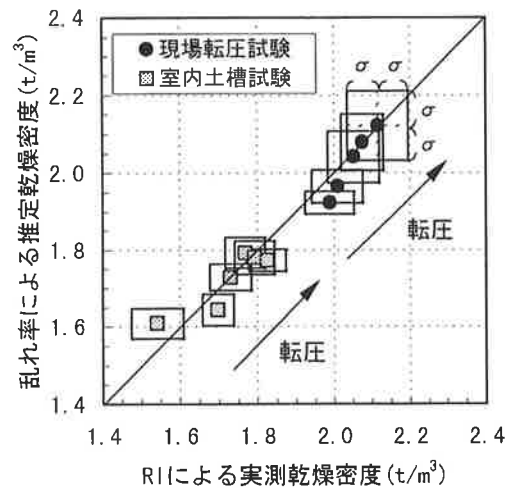


図-12 推定密度と実測密度の比較

もとバラツキの大きな材料であるにもかかわらず、密度測定に多大な労力を要し統計的处理に十分なデータ数を確保できないため、やむを得ず下限値管理を行っているのが現状である。これに対し、振動ローラ加速度から多点的に密度分布を推定すれば、堤体の平均的な密度を把握することが可能となるため、より合理的な堤体の設計・管理が行えるであろう。

4.2 地盤変形係数の推定結果

数値計算により準備した前述の式[2]を用い、加速度から推定した地盤バネ係数を、横方向ロード載荷試験により求めた変形係数と比較した結果を図-13に示す（図中ではSITE-C）。さらに図には、筆者らが過去に実施した別サイトにおける実験結果⁶⁾も併記した（図中のSITE-A,B）。このSITE-A,Bでは地盤剛性を重錘落下手法¹⁴⁾を用いて計測している。なお、各測定手法を同一の指標で比

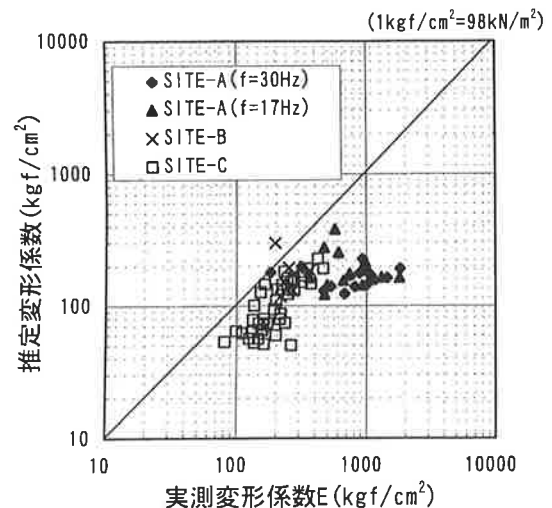


図-13 加速度による推定変形係数と既往測定手法による変形係数の比較

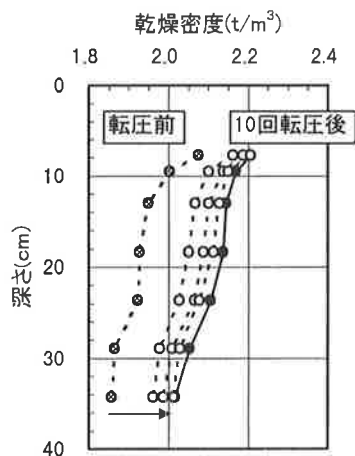


図-14 2孔式RIによる深さ方向の密度分布

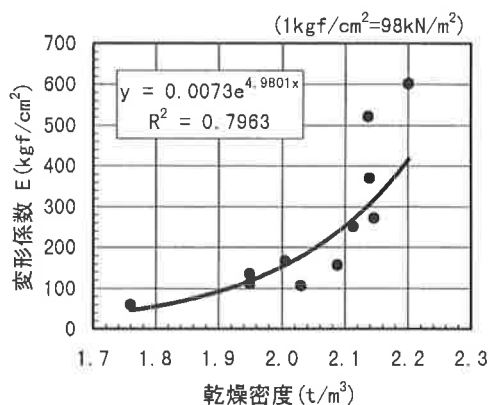


図-15 RI 乾燥密度～変形係数の関係

較するため、加速度から推定される地盤バネ係数 k_2 は次式[4]¹⁵⁾により変形係数 E に換算している。

$$E = \frac{2k_2(1-\nu^2)}{B \cdot \pi} \quad [4]$$

B ; ローラ幅(m), ν ; ポアソン比 (0.3と仮定)

図をみると、ばらつきはやや大きいものの、両者の対応は比較的良好であり、提案式の妥当性が示唆される。ただし、図-13によると加速度から推定した変形係数は横方向ロード載荷試験・重錘落下手法による評価値の1/2～1/5程度の値を与えているようである。このように加速度からの推定値が小さくなった理由の一つとして、撒き出し層内における密度勾配の存在と、それに対する両手法の測定範囲の違いが挙げられる。

今回の現場転圧試験 (SITE-C) において測定した、2孔式RIによる深さ方向の密度計測結果を図-14に示す。これをみると、撒き出し直後からすでに密度勾配が生じており (粗粒材であったため、撒き出し時の材料分離によ

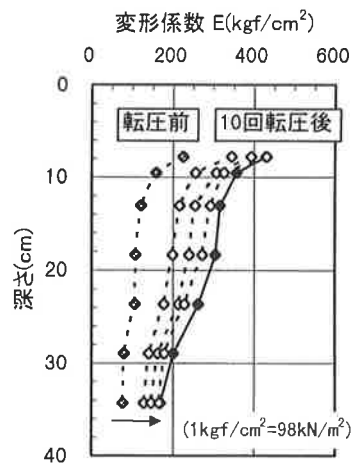


図-16 変形係数の深さ方向分布の推定

り上層ほど密度が高くなったものと予想される¹³⁾), それがほぼ平行移動した形で推移しながら、転圧後も上層ほど密度が高い状態となっている。また、横方向ロード載荷試験による変形係数と同測定地点で実施した表面型RIによる乾燥密度の相関が、図-15に示すように比較的良好に得ることができていたため、両者の関係を指数近似し、これを用いて図-14の乾燥密度深さ方向分布から変形係数の深さ方向分布を推定してみた。この結果を図-16に示すが、盛土深部の変形係数は地表面付近の約1/3となり、深さ方向への低減はかなり顕著であることが伺える。

一方、撒き出し後の密度分布形状が転圧にともなってほぼ平行に推移していることから、転圧エネルギーは撒き出し層内の全層にわたって伝達されていると予想される¹³⁾。従って、加速度からの推定値は、ローラの振動伝達範囲に相当する深部の低剛性の領域までを含めた評価値を示すと考えられるが、これに対し横方向ロード載荷試験はその測定規模 (ロード根入深さ20cm) から地表面近傍の局所的な剛性の高い領域を評価していると考えられ、これが両者の評価値の違いに反映された可能性がある。逆に言えば、振動ローラ加速度によれば表層の局所的な剛性ではなく締固め層内全層の剛性を評価できるため、より合理的な方法であるといえよう。

5. おわりに

振動ローラの加速度応答を利用して地盤の締固め度を評価する研究が従来から行われてきたが、本研究では粗粒材料を用いて室内大型土槽試験および現場転圧試験を行った結果、以下の知見を得た。

(1)RI 乾燥密度と乱れ率は良好な相関を示し、両者の相関関係を利用して転圧面の密度分布を多点的に求めることで、既往のRI法と同等の精度で転圧面の密度分布を把握できる。

(2)既往測定手法による原位置変形係数との比較から、筆者らの提案する変形係数推定手法が妥当であること、また加速度によって締固め全層の変形係数を把握できる可能性があることが示された。

一般に、ローラ挙動は密度ではなく地盤の剛性に対応すると考えられる。したがって、高含水比の細粒土のような転圧時に地表面の間隙水圧が上昇し、締固めの進行にも関わらず地表面の剛性が低下するような材料では、本手法は施工管理手法として適さないことも予想される。今回は粗粒材料を対象としたが、粒度・含水比などが異なる多様な土質に対し、適用性の把握を行っていくことが今後の課題であると考えている。

謝辞：酒井重工業（株）技術研究所からは室内大型土槽をお借りし、さらに各種計測に際して多大なるご協力を頂いた。ここに感謝の意を記す次第である。

参考文献

- 1) R. Floss, etc : A Dynamical Test Method For Continuous Compaction Control, Proceedings of the 8th European Conference On Soil and Foundation Engineering, vol.1, pp.25~30, 1983.
- 2) 嶋津晃臣, 見波 潔 : 振動ローラによる盛土の締固めに関する調査, 土木研究所資料第2184号, pp.37~76, 1985.
- 3) 畠昭治郎, 建山和由 : 振動ローラの振動加速度振幅による締固めの判定, テラメカニックス研究会第3回研究会講演, pp.64~68, 1983.
- 4) 阿部 裕, 鬼木剛一, 北本幸義 : 盛土の振動締固め管理手法に関する研究 (その1), 鹿島建設技術研究所年報第35号, pp.179~184, 1987.
- 5) 中村孝雄, 南条章, 松本夷喜二 : 路床・路盤の締固め管理の一手法について, 第18回日本道路会議論文集, pp.552~553, 1989.
- 6) 藤山哲雄, 建山和由 : 振動ローラの加速度応答を利用した地盤剛性の評価手法とその締固め管理への応用, 土木学会論文集 (投稿中) .
- 7) 藤井弘章, 渡辺 忠 : 種々の締固め管理方法の比較, 第21回土質工学会年講, pp.1771~1774, 1986.
- 8) 三上博, 阿部裕, 岩崎礼栄雄, 熊谷浩二 : 大型締固め機械による盛土の厚層締固め試験 (その2, 砂礫土), 第32回地盤工学会年講, pp.2227~2228, 1997.
- 9) 吉井幸雄, 延山政之ら : 簡易な載荷試験法の一つの試み, 第18回土質工学会年講, pp.61~64, 1983.
- 10) 瀬古育二, 大本家正, 柏木 順, 青木美樹 : ロックフィルダムの粗粒材料の盛立密度測定方法, 土と基礎, Vol.37, No.7, pp.11~16, 1989.
- 11) 建山和由, 藤山哲雄, 西谷誠之 : 締固め施工における振動ローラの振動挙動に関する考察, 土木学会論文集No.554/III-37, pp.231~238, 1996.
- 12) 豊田光雄 : フィルダム盛立材料の現場密度測定に関する研究, ダム技術, No.125, pp.23~34, 1997.
- 13) 土質工学会編 : 粗粒材料の現場締固め, pp.124~149, pp.169~191, 1989.
- 14) 田中宏征, 建山和由 : 重錘落下手法による締固め地盤の支持力評価とその施工管理への応用, 第27回土質工学会年講, pp.2107~2110, 1992.
- 15) 建山和由 : 土の締固め施工の合理化に関する研究, 京都大学学位論文, pp.66, 1988.